

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.32>

## **Hidrodinamički model strujanja vodonosnika “Bokanjac – Poličnik” - kalibracija**

**Željko Šreng<sup>1</sup>, Goran Lončar<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Sveučilište u Osijeku, Građevinski fakultet

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

kontakt: [zsreng@gfos.hr](mailto:zsreng@gfos.hr)

### **Sažetak**

Za simulaciju toka podzemnih voda u kršu primjenjuju se razni tipovi determinističkih modela, kao što su model ekvivalentnog poroznog medija (eng. *Single-Continuum Porous – Equivalent - SCPE*), hibridni model (HM), diskretni model s jednom ili više pukotina. Najjednostavniji pristup od svih je primjena SCPE modela koji se bazira na pretpostavci laminarnog toka te konstantne temperature, gustoće i viskoznosti vode, gdje je tok vođen potencijalnom energijom, tj. gradijentom tlaka. Cilj ovog rada je primijeniti SCPE pristup unutar numeričkog modela Modflow kako bi se simuliralo otjecanje podzemnih voda u krškom vodonosniku “Bokanjac – Poličnik” te dobio uvid u raspodjelu ekvipotencijala i strujnog polja unutar vodonosnika. Sliv “Bokanjac – Poličnik” predstavljen je ortogonalnom mrežom s ćelijama dimenzija 200 m x 200 m u horizontalnoj ravnini te s dva sloja u vertikalnom smjeru. Kalibracija se odnosi na 29. siječnja do 30. lipnja 1967. godine (153 dana). Korišteni su podaci dnevnih oborina s ombrografske stanice smještene unutar analiziranog područja. Simulacija je pokazala da se definiranjem pukotina na način da im se pridruže velike vrijednosti koeficijenata propusnosti mogu uspješno opisati pojave unutar vodonosnika, bez upotrebe sofisticiranijih modela kao što je hibridni model (HM).

**Ključne riječi:** *krški vodonosnik, strujanje, Modflow, SCPE*

## **Hydrodynamic model of groundwater flow in “Bokanjac - Poličnik” aquifer - calibration**

### **Abstract**

Deterministic models such as Single – continuum porous – equivalent (SCPE), the hybrid model (HM), the discrete single fracture or pipe set model (DSFS), and the discrete multiple fracture or pipe set model (DMFS) have been used in simulating groundwater flow in karst aquifer. The simplest one, the SCPE, is based on laminar flow assumption with constant temperature, density and viscosity of water where flow can be simulated with the potential flow equation of fluid mechanics. The goal of this paper is to apply SCPE approach within numerical model Modflow in order to simulate groundwater flow in karst aquifer “Bokanjac – Poličnik” and to get insight into spatial distribution of equipotentials and flow field. Catchment “Bokanjac – Poličnik” is represented by an orthogonal network with grid spacing of 200x200 m in horizontal plane and with two layers in vertical direction. Calibration period covers period from 29.1.1967 to 30.6.1967 (153 days). Data from nearby ombrographic station were used. Simulation shows that defining of karst fractures with very large hydraulic conductivity cells in an SCPE approach can successfully describe flow regime within karst aquifer.

**Keywords:** *karst aquifer, groundwater flow, Modflow, SCPE*

## 1 Uvod

Za simulaciju toka podzemnih voda u kršu primjenjuju se razni tipovi determinističkih modela, kao što su model ekvivalentnog poroznog medija (eng. *Single-Continuum Porous – Equivalent*, SCPE), hibridni model (HM), diskretni model s jednom ili više pukotina. Najjednostavniji pristup od svih je primjena SCPE modela koji se bazira na pretpostavci laminarnog toka te konstantne temperature, gustoće i viskoznosti vode, gdje je tok vođen potencijalnom energijom, tj. gradijentom tlaka. Primjena SCPE modela u analiziranom području moguća je ako je područje istraživanja mnogo veće od reda heterogenosti geološke strukture unutar vodonosnika. Primjena SCPE pristupa pokazala se uspješnom na mjestima gdje se model mogao kalibrirati uz pomoć parametara toka i razina vode [1-5]. Osnovna ideja je da se ćelijama unutar modela kroz koje prolaze veće pukotine pridruže mnogo veće vrijednosti hidrauličke vodljivosti u odnosu na okolne ćelije. Okolne ćelije, tzv. matriks, predstavljaju slabo propusnu kršku stijenu. Zna li se točan raspored pukotina i njihov smjer pružanja i konačni model bit će točniji i pokazivat će vjerodostojnije rezultate. Takve informacije iznimno je teško prikupiti te iziskuju skupa terenska istraživanja, a ako nisu dostupne istraživač je prisiljen poduzeti složen proces kalibracije i primjenu znanja iz ostalih istraživanja. Cilj je ovog rada primijeniti SCPE pristup unutar numeričkog modela Modflow kako bi se simuliralo otjecanje podzemnih voda u krškom vodonosniku "Bokanjac – Poličnik", tj. kako bi se napravila kalibracija modela koji će poslužiti u nastavku istraživanja s konačnim ciljem definiranja potencijalnih mjesta onečišćenja i režima pronosa onečišćivača kroz krški vodonosnik.

## 2 Područje istraživanja

Područje istraživanja smješteno je u zaleđu grada Zadra (slika 1.). Teren je tipičan primjer dinarskog krša, građen od karbonatnih stijena. Gornji dio terena karakteriziran je kao izrazito okršten i relativno plitki sloj, dok su dublji dijelovi slabo propusne stijenske mase s mrežom pukotina kroz koje se odvija glavina toka [6]. Vodonosnik "Bokanjac – Poličnik" predstavlja složeni krški sustav isprepleten rasjedima, nepropusnim slojevima, ponorima i izvorima. Sustav se može podijeliti u nekoliko podslivova, ali njihove granice nisu jasno definirane. Kretanja podzemne vode u smjeru je sjeverozapada s prosječnom brzinom od 0,08 m/s, što je dokazano traser-testovima (Fritz, 1976). Također, dokazana je i podzemna konekcija od ponora Biljane Donje do izvora Golubinka koji se nalazi na sjevernom dijelu sliva "Bokanjac – Poličnik" (slika 1.). Voda iz vodonosnika služi za opskrbu stanovništva grada Zadra i okolne regije. Aktivno je pet izvora unutar regije: Bokanjac (B4 i B5) – minimalni kapacitet 30 l/s, maksimalni 500 l/s, Jezerce – minimalni 30 l/s, maksimalni 500 l/s, Golubinka – minimalni 50 l/s, maksimalni 300 l/s, Boljkovac – minimalni 40 l/s, maksimalni 100 l/s.



Slika 1. Hidrogeološka karta sjevernog dijela sliva "Bokanjac – Poličnik"

### 3 Hidrodinamički model strujanja podzemnih voda

Programski paket Modflow koristio se u analizi strujanja podzemnih voda, zajedno sa SCPE numeričkom strategijom, kako bi se dobio uvid u raspodjelu ekvipotencijala i strujnog polja unutar vodonosnika. Modflow se vrlo često primjenjuje u simulaciji toka podzemnih voda pri različitim hidrogeološkim uvjetima [7, 8]. Rezultati strujanja podzemne vode dobiveni su rješavanjem jednadžbe

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

gdje su:

$k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}$  - hidraulička vodljivost u smjeru  $x$ ,  $y$  i  $z$

$h$  - piezometarska visina

$W$  - volumski protok koji predstavlja izvor i/ili ponor

$S_s$  - koeficijent specifičnog uskladištenja poroznog medija,  $t$  vrijeme.

Sliv “Bokanjac – Poličnik” predstavljen je ortogonalnom mrežom s ćelijama dimenzija 200 x 200 m u horizontalnoj ravnini (slika 2.) te s dva sloja u vertikalnom smjeru. Donji sloj je debljine 1 m (od -2 m n. m. do -1 m n. m.), a gornji 101 m (od -1 m n. m. do 100 m n. m.). Kalibracija se odnosi na period od 29. siječnja do 30. lipnja 1967. (153 dana), oslanjajući se na izmjerene razine podzemne vode u piezometrima P1, P2, P5, P10, P12, P15, BP1, S1, S2, S7, S9, BS5, BS14, BS16 (slika 2). Upotrijebljeni su podaci dnevnih oborina s ombrografske stanice smještene unutar analiziranog područja. Primijenjena je vrijednost koeficijenta infiltracije od 0,6 [9]. Vremenske serije razina podzemnih voda s piezometara P15, S1 i BS14 služile su kao rubni uvjeti modela (slika 2.). Parametrizacija modela u smislu određivanja prikladnih vrijednosti hidrauličke vodljivosti  $k_{x,y,z}$ , efektivne poroznosti  $n_{eff}$  i ukupne poroznosti  $n_{tot}$  usvojena je na temelju kalibracijskog procesa, a vrijednosti su prikazane na slikama 3 i 4 te u tablici 1. Velike brzine javljaju se u donjem sloju, gdje su zadane veće vrijednosti koeficijenta provodljivosti s ciljem simulacije pukotina kroz koje protječe većina toka.



Slika 2. Prostorna domena vodonosnika “Bokanjac – Poličnik” unutar modela Modflow, lokacije piezometara i rubnih uvjeta korištenih u kalibraciji

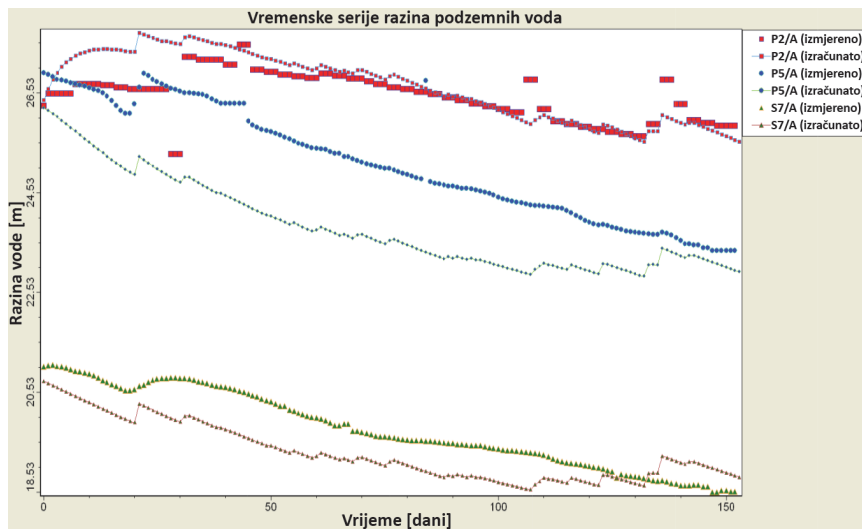
Tablica 1. Vrijednosti efektivne poroznosti  $n_{eff}$  i ukupne poroznosti  $n_{tot}$  usvojene na temelju kalibracijskog procesa

Sloj	Parametar	
	$n_{eff}$ (1)	$n_{tot}$ (1)
Gornji	0,09	0,1
Donji	0,06	0,15
	0,03	0,15
	0,05	0,15



Slika 3. Prostorna raspodjela koeficijenta hidrauličke vodljivosti na gornji sloj (iznad) i donji sloj (ispod)

Rezultati usporedbe razina podzemnih voda između modeliranih i izmjerenih vrijednosti na piezometrima P2, P5 i S7 prikazani su na slici 4. Razlika između modeliranih i izmjerenih vrijednosti razina podzemne vode nalazi se unutar kalibracijskog kriterija od plus, minus 1,5 m [10].



Slika 4. Mjerene i modelirane vremenske serije dnevnih razina podzemnih voda na piezometrima P2, P5, S7 tijekom kalibracijskog perioda 29. siječnja 1967-30. lipnja 1967.

## 4 Zaključak

Prividne brzine dobivene simulacijom odgovaraju mjerenim vrijednostima. Najveće brzine javljaju se u smjeru istok-zapad, od piezometra P1 prema izvoru Golubinka i iznose između 0,8 m/s i 0,12 m/s. Takve brzine ostvarene su manjom efektivnom poroznošću pukotina ( $n_{eff} = 0,03$ ). Brzine u smjeru sjever-jug, prema Bokanjačkom blatu i bunarima Jezerce, B4 i B5 nešto su manje i iznose od 0,2 m/s do 0,4 m/s, što je posljedica manje propusnih slojeva tla koji razdvajaju sjeverni i južni dio sliva “Bokanjac – Poličnik”.

Simulacija je pokazala da se definiranjem pukotina na način da im se pridruže velike vrijednosti koeficijentata propusnosti mogu dosljedno opisati pojave unutar vodonošnika, a da nisu potrebni sofisticiraniji modeli kao što je hibridni model (HM).

## Literatura

- [1] Svensson, U.: A continuum representation of fracture networks, Part I: Method and basic test cases, *Journal of Hydrology*, 250 (2001), pp. 170-186
- [2] Knowles, L. et al.: Hydrogeology and simulated effects of ground-water withdrawals from the Floridan Aquifer System in Lake County and in the Ocala National Forest and vicinity, U.S.Geological Survey Water-Resources Investigations Report, pp. 140, 2002.
- [3] Grubbs, J.W., Crandall, C.A.: Exchanges of water between the Upper Floridan aquifer and the Lower Suwannee and Lower Santa Fe Rivers, Florida: U.S. Geological Survey Professi-

onal Paper, pp. 83, 2007.

- [4] Davis, J.H. et al.: Nitrate-N movement in groundwater from the land application of treated municipal wastewater and other sources in the Qakulla Springs springshed, U.S.Geological Survey Water-Resources Investigations Report, pp. 90, 2010.
- [5] Sepulveda et al.: Groundwater flow and water budget in the surficial and Floridan aquifer systems in east-central Florida, U.S.Geological Survey Water-Resources Investigations Report, pp. 214, 2012.
- [6] Pavičić, A., Terzić, J., Berović, N.: Hydrogeological relations of the Golubinka karst spring in Ljubač Bay, Dalmatia, Croatia. Geol. Croat., 59 (2006), pp. 123–135.
- [7] El Yaouti, F., El Mandour, A., Khattach, D., Kaufmann, O.: Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Marocco), Journal of Hydro-environment Research, 2 (2008), pp. 192-209.
- [8] Posavec, K., Mustač, I.: Zone sanitarne zaštite međimurskih vodocrpilišta, Hrvatske vode, 17 (2009) 68, pp. 113-124.
- [9] Bonacci, O.: Monthly and annual effective infiltration coefficients in Dinaric karst: example of the Gradole karst spring catchment, Hydrological Sciences-J'ournal-des Sciences Hydrologiques, 46 (2001) 2, pp. 287-299.
- [10] Gellegos, J.J. et al.: Simulating flow in karst aquifers at laboratory and sub-regional scales using MODFLOW